

Abschlussbericht

zum Verbundvorhaben

**Forschung und Demonstratoren hinsichtlich Spezialbeleuchtungs-
und Signage-Anwendungen basierend auf OLED-Lichttechnologie**

Akronym: So-Light

Teilprojekt: Effiziente Auskoppeloptiken für OLEDs

Teilprojektkoordinator:

Dr. Frank Kühnlenz
Fresnel Optics GmbH
Flurstedter Marktweg 13
D-99510 Apolda

Zahlungsempfänger: Fresnel Optics GmbH Flurstedter Marktweg 13 D - 99510 Apolda	Förderkennzeichen: 13N10532
Vorhabensbezeichnung: Forschung und Demonstratoren hinsichtlich Spezialbeleuchtungs- und Signage-Anwendungen basierend auf OLED-Lichttechnologie (So-Light) Teilprojekt: Effiziente Auskoppeloptiken für OLEDs	
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2009 - 30.11.2012	
Berichtszeitraum: 01.07.2009 - 30.11.2012	

1 Motivation und Zielstellung des Vorhabens

1.1 Motivation und Gesamtzielstellung

Organische Leuchtdioden gelten als die erste wirkliche Flächenlichtquelle in der Geschichte. Aktuell hat die OLED-Performance hinsichtlich Leistungseffizienz und Lebensdauer bei Raumtemperatur einen Stand erreicht, der ausreichend für die weitere Integration von OLED-Basisbauelementen in ersten Anwendungen ist. Die wesentlichen Parameter stellen sich dabei wie folgt dar:

- Helligkeit
Typische Helligkeiten für Beleuchtungsanwendungen liegen mit zwischen 500 und mehreren 1000 cd/m² in einem Bereich, den OLEDs mittlerweile sehr gut abdecken können.
- Leistungseffizienz
Für Weisslicht-OLEDs werden aktuell Werte zwischen 35 und 100 lm/W kommuniziert, wobei die höheren Werte mit einem höheren Grünanteil und einer kürzeren Lebensdauer verbunden sind. Für grüne OLEDs werden über 100 lm/W erreicht, während die Leistungseffizienz von roten OLEDs im Bereich von 13 bis 30 lm/W liegt. Für blaue OLEDs liegt der Effizienzwert bei ca. 6 - 8 lm/W.
- Lebensdauer
Die Lebensdauern liegen bei etwa 1·10⁵ Stunden für Weisslicht-OLEDs, bei 1-2·10⁵ Stunden für grüne OLEDs und bei 1·10⁶ Stunden für rote OLEDs. Bei blauen OLEDs wird eine Lebensdauer von 1-3·10⁴ Stunden erreicht.
- Temperaturbereich
OLEDs lassen sich problemlos zwischen -30 °C und 40 °C betreiben. Mit speziellen OLED-Strukturen sind Temperaturen bis hin zu 85 °C möglich.

Diese aktuellen Entwicklungen auf dem Gebiet der organischen Leuchtdioden lassen erwarten, dass damit eine Lichtquellentechnologie entsteht, die langfristig

das Potential für einen Einsatz in der Allgemeinbeleuchtung aufweist. Mittelfristig entstehen Anwendungspotentiale für Bereiche der Spezialbeleuchtung, in denen flächenhafte Weißlichtstrahler vorteilhaft eingesetzt werden können. Dazu gehören beispielsweise die Architekturbeleuchtung von Gebäuden, die Innenbeleuchtung von Fahrzeugen sowie verschiedene andere Nischenapplikationen. Ein weiteres Beispiel für mittelfristige Anwendungspotentiale bilden OLED-Applikationen aus dem Bereich der strukturierten Beleuchtung (Signage), bei denen Orientierungs-, Markierungs- bzw. Signalisierungsfunktionen (z. B. Markierung von Fluchtwegen) durch spezielle OLED-Anordnungen realisiert werden.

Zielstellung des Vorhabens So-Light war daher die weitergehende Erforschung der Grundlagen für OLED-Anwendungen sowie die Entwicklung und der Aufbau von Demonstratoren für Anwendungen aus den Bereichen Spezialbeleuchtung und Signage. Das Vorhaben war an die gesamte Wertschöpfungskette angelehnt und beinhaltete

- die Erforschung und Entwicklung neuer OLED-Materialien,
- die Erforschung und Entwicklung erforderlicher Prozesstechnologien und
- die Entwicklung von Demonstratoren und Integrationstechnologien

auf Basis der COMMEDD-Pilotanlage am Fraunhofer IPMS, mit der Anwendungen für mittlere Stückzahlen und mit einem flexiblen Fertigungskonzept außerhalb der Allgemeinbeleuchtung realisiert werden sollen. Dabei geht es speziell darum, die erforderliche Basis für die Etablierung des Geschäftsfeldes OLED-Beleuchtung in Deutschland zu legen und damit einen Wettbewerbsvorteil von deutschen Firmen in den Geschäftsfeldern OLED-Beleuchtung und OLED-Signage zu etablieren. Damit sind die Ziele des Vorhabens So-Light voll konform mit der OLED-Initiative des BMBF und im speziellen mit der Bekanntmachung „Organische Leuchtdioden - Phase 2“ im Rahmen der Förderprogramme „Optische Technologien“ und „Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft“.

1.2 Wissenschaftlich-technische Arbeitsziele

Ein maßgebender Faktor für den Einsatz von OLEDs in ersten Anwendungen ist deren Leistungseffizienz die im wesentlichen durch drei Faktoren bestimmt wird:

- | | |
|-----------------------------|-----------------------|
| • Betriebsspannung: | so gering wie möglich |
| • Interne Quanteneffizienz: | so hoch wie möglich |
| • Optische Auskopplung: | so hoch wie möglich |

Diese drei Faktoren können durch Auswahl geeigneter OLED-Materialien, durch speziell für die OLED-Herstellung optimierte Fertigungsprozesse sowie durch die Optimierung der eingesetzten Auskoppeloptiken entsprechend beeinflusst werden. Durch die Anlehnung des Vorhabens an die gesamte Wertschöpfungskette war es möglich, alle drei Faktoren weitergehend und im Hinblick auf die Realisierung von Anwendungsdemonstratoren zu erforschen. Die dabei im Rahmen des Vorhabens bearbeiteten Fragestellungen zu den OLED-Materialien und Fertigungsprozessen

sowie deren Ergebnisse sind in den Zwischen- sowie den Abschlussberichten der jeweiligen Projektpartner ausführlich dokumentiert.

Ein Schwerpunkt der Fresnel Optics GmbH innerhalb des Projektverbundes war die Bearbeitung von Fragestellungen zur Erhöhung der optischen Auskopplung sowie der Entwicklung von nachgelagerten Optiken, die das Licht in einer für die Anwendung geeigneten Weise lenken und verteilen. Die Erhöhung der optischen Auskopplung und die optimale Anpassung des ausgekoppelten Lichtes an das Strahlprodukt der jeweiligen Applikation erfordern ein ganzheitliches optisches Modell des Stackaufbaus der im Vorhaben zu verwendenden OLEDs sowie deren eingehende optische Vermessung. Ein weiteres Ziel der optischen Vermessung der OLEDs bestand in der initialen Untersuchung des Einflusses potentieller Auskoppeloptiken auf die Abstrahlcharakteristik der OLEDs, um diese bereits bei der Entwicklung des Designmodells berücksichtigen zu können. Die Informationen zur OLED-Struktur wurden vom Fraunhofer IPMS zur Verfügung gestellt, während die optische Charakterisierung bei der Firma Ilexa in Ilmenau durchgeführt wurde. Auf Basis dieser Daten sowie der im Förderprojekt „HOBBIT“ bereits erarbeiteten komplexen Designsoftware für OLEDs wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IOF im Unterauftrag das optische Design für die Auskoppeloptiken sowie die Optiken zur Lichtlenkung und Lichtverteilung entwickelt.

Basierend auf den Untersuchungen zum optischen Design wurden Vorschläge für die Realisierung der von den Endanwendern Hella, Siteco und AEG MIS spezifizierten Demonstratoren erarbeitet. Hierbei handelte es sich immer um zweistufige Optiken, bestehend aus einer Primäroptik zur Erhöhung der Auskoppelleffizienz und einer Sekundäroptik zur Lichtlenkung und Lichtverteilung. Die Vorschläge wurden mit den Endanwendern im Hinblick auf die zu realisierende Lichtverteilung und Effizienz diskutiert. Als Ergebnis wurde das finale Konzept für die im Vorhaben zu realisierenden Demonstratoren erarbeitet und anschließend umgesetzt. Für die Realisierung der Demonstratoren war es erforderlich, bei Fresnel Optics vorhandene Basistechnologien bzw. Prozesse unter Verwendung von vorhandener Anlagentechnik weiterzuentwickeln und sowohl an die Spezifika der OLEDs selbst als auch an die spezifischen Erfordernisse bzgl. der Fertigung der Demonstratoren anzupassen.

Eine grundlegende Voraussetzung für die Replikation optischer Komponenten ist die Erstellung der entsprechenden Werkzeugoriginale und deren Replikation. Da die Gefahr der Beschädigung des Werkzeuges während des Abformprozesses besteht, ist der direkte Einsatz von Werkzeugoriginalen nicht unbedingt sinnvoll. Aus diesem Grund ist die Verwendung von Fertigungswerkzeugen üblich, die z. B. durch galvanische Replikation aus dem Original erstellt werden. Ein Arbeitspaket von Fresnel Optics beinhaltete deshalb die Untersuchung von Möglichkeiten zur Erstellung von Werkzeugoriginalen und deren Replikation. Die Galvanikreplikation von mittels Präzisionsdiamantschneiden erstellten Werkzeugoriginalen ist ein bei Fresnel Optics etabliertes Verfahren. Nur wenig Erfahrung besteht hingegen in der galvanischen Replikation von photolithographisch erstellten Werkzeugoriginalen. Deshalb wurde die vorhandene Technologie der galvanischen Replikation bzgl. ihrer Eignung für die Replikation dieser Werkzeugoriginale untersucht.

Eines der Hauptziele von Fresnel Optics im Vorhaben war es, die Auskoppeloptik direkt auf das OLED-Substrat selbst zu applizieren. Hierfür wurde die bei Fresnel

Optics vorhandene POG-Technologie (POG - Polymer On Glass) weitergehend erforscht. Speziell die Abformung der Optiken auf das OLED-Substrat erforderte die Entwicklung eines neuen Werkzeugkonzeptes. Basierend auf den galvanisch replizierten Nickelwerkzeugen und vorhandenen Basistechnologien wurde hierfür das Konzept eines transparenten Werkzeuges entwickelt. Des weiteren war es für die Abformung der Optiken erforderlich, etablierte Technologien bzw. Prozesse an die Spezifika der OLEDs selbst als auch an die spezifischen Erfordernisse bzgl. der Fertigung der Demonstratoren zu adaptieren.

2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

2.1 Optische Charakterisierung der OLEDs

Ein wesentliches Arbeitspaket von Fresnel Optics beinhaltete Fragestellungen zum optischen Design, sowohl für Auskoppeloptiken zur Erhöhung der Effizienz als auch zur Entwicklung von Strahlführungs- und Strahlformungsoptiken bezogen auf die von den Endanwendern im Rahmen des Vorhabens spezifizierten Applikationen. Basis für eine zielführende Bearbeitung der Fragen zum optischen Design ist die Kenntnis des Stackaufbaus der im Vorhaben zu verwendenden OLEDs sowie deren eingehende optische Vermessung. Diese Informationen stellen die Basisdaten zur Entwicklung geeigneter Designmodelle für die Entwicklung der Auskoppel- und Strahlformungsoptiken dar. Die Informationen zum Stackaufbau der OLEDs wurden vom Fraunhofer IPMS zur Verfügung gestellt, die messtechnische Charakterisierung konnte erst Mitte 2010 erfolgen, da erst zu diesem Zeitpunkt entsprechende Muster zur Verfügung gestellt werden konnten. Um den dadurch entstandenen Zeitverlust zu minimieren, wurde die optische Charakterisierung der OLEDs bei der Firma Ilexa in Ilmenau durchgeführt.

Ziel der optischen Charakterisierung war die Gewinnung von Basisdaten für das optische Design. Hierfür erfolgte die Messung der BTDF der OLEDs für ausgewählte RGB-Wellenlängen sowohl mit als auch ohne mittels Immersionsöl angekoppelter Glashalbkugel.

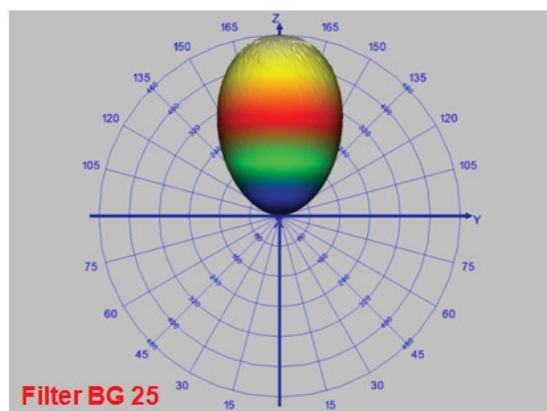


Abb. 1: BTDF einer OLED aufgenommen mittels Blaufilter BG 25. Der kurzwellige Anteil des emittierten Lichtes weist eine deutliche Orientierung in Vorwärtsrichtung auf.

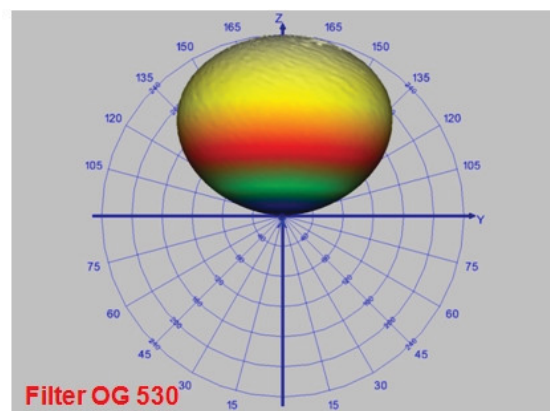


Abb. 2: BTDF einer OLED aufgenommen mittels Gelbfilter OG 530. Der langwellige Anteil des emittierten Lichtes ist einer Lambertverteilung ähnlich.

Ein wesentliches Ergebnis dieser Untersuchungen ist in Abb. 1 und Abb. 2 dargestellt. Abb. 1 zeigt die BTDF einer OLED aufgenommen mit einem Blaufilter BG 25 zur Selektion des kurzwelligen Anteils des emittierten Lichtes. Dieser weist eine deutliche Orientierung in Vorwärtsrichtung auf, d.h. unter größeren Blickwinkeln fehlt dieser Anteil aufgrund von Totalreflexion sowohl im Substrat als auch an der Grenzfläche des Substrates zur Luft. Im Gegensatz dazu ähnelt die in Abb. 2 dargestellte BTDF, aufgenommen mit einem Gelbfilter OG 530 zur Selektion des langwelligen Lichtanteiles, einer Lambertverteilung. Dies weist auf ein deutlich besseres Lichtrecycling des langwelligen Anteils des emittierten Lichtes hin.

Ein weiteres Ziel der optischen Charakterisierung der OLEDs bestand in der initialen Untersuchung des Einflusses potentieller Primäroptiken auf die Abstrahlcharakteristik. Für diese Untersuchungen wurden vier prinzipielle Auskoppelstrukturen (Mikrolinsen, Prismen, Strahlteiler, Diffusoren) selektiert und anhand von bei Fresnel Optics vorhandenen Mustern mittels Immersionsankopplung partiell vermessen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass alle Strukturen die Auskoppel-effizienz der OLEDs erhöhen, es konnten an den untersuchten Mustern die folgenden Effizienzerhöhungen ermittelt werden:

- | | |
|-------------------------|---------------|
| • Mikrolinsen: | ca. 32 – 46 % |
| • Fresnel-Prismen: | ca. 24 – 28 % |
| • Fresnel-Strahlteiler: | ca. 14 – 20 % |
| • Diffusoren: | ca. 12 – 16 % |

Diese Werte beziehen sich immer auf das OLED-Substrat ohne Auskoppelloptik, wobei der Grad der Effizienzerhöhung zusätzlich von der konkret vorliegenden Geometrie der jeweiligen Mikrostruktur (z.B. vom Prismenwinkel) abhängig ist.

2.2 Untersuchung von Varianten für die Auskoppelloptik (Primäroptik)

Es wurden unterschiedliche Varianten von Mikrostrukturen bzgl. ihrer Eignung als Primäroptik mittels Raytracing-Software analysiert. Da basierend auf den initialen Untersuchungen zum Einfluß potentieller Auskoppelloptiken auf die Abstrahlcharakteristik der OLEDs von Mikrolinsen und mikrop Prismatischen Strukturen der höchste Zugewinn an Effizienz zu erwarten war, wurden die Analysen auf diese Strukturen beschränkt.

In Abb. 3 sind die Ergebnisse der Analysen von unterschiedlichen Varianten von Mikrostrukturen bzgl. ihrer Eignung als Auskoppelloptik dargestellt. Es hat sich gezeigt, daß mit vollen 2D-Prismen nahezu die gleiche Auskoppel-effizienz ($\eta = 1,74$) zu erreichen ist wie mit Mikrolinsen ($\eta = 1,79$). Dabei weist die mit 2D-Prismen erreichte Winkelverteilung im Vergleich zu den Mikrolinsen eine deutliche Betonung der Vorwärtsrichtung auf. Die mit 2D-Prismenstümpfen erreichbare Auskoppel-effizienz von $\eta = 1,55$ ist im Vergleich zu den Mikrolinsen und vollen 2D-Prismen geringer, allerdings weist die Winkelverteilung ein Plateau auf. Dies kann für Anwendungen die eine gleichmäßig hohe Helligkeit über einen größeren Winkelbereich erfordern von Vorteil sein. Gegenüber den Messdaten von Ilexa sind die berechneten Faktoren für den Effizienzgewinn durch die Primäroptik erhöht. Eine unmittel-

telbare Ursache hierfür ist die Annahme eines absorptionsfreien Polymermaterials im OLED-Substrat.

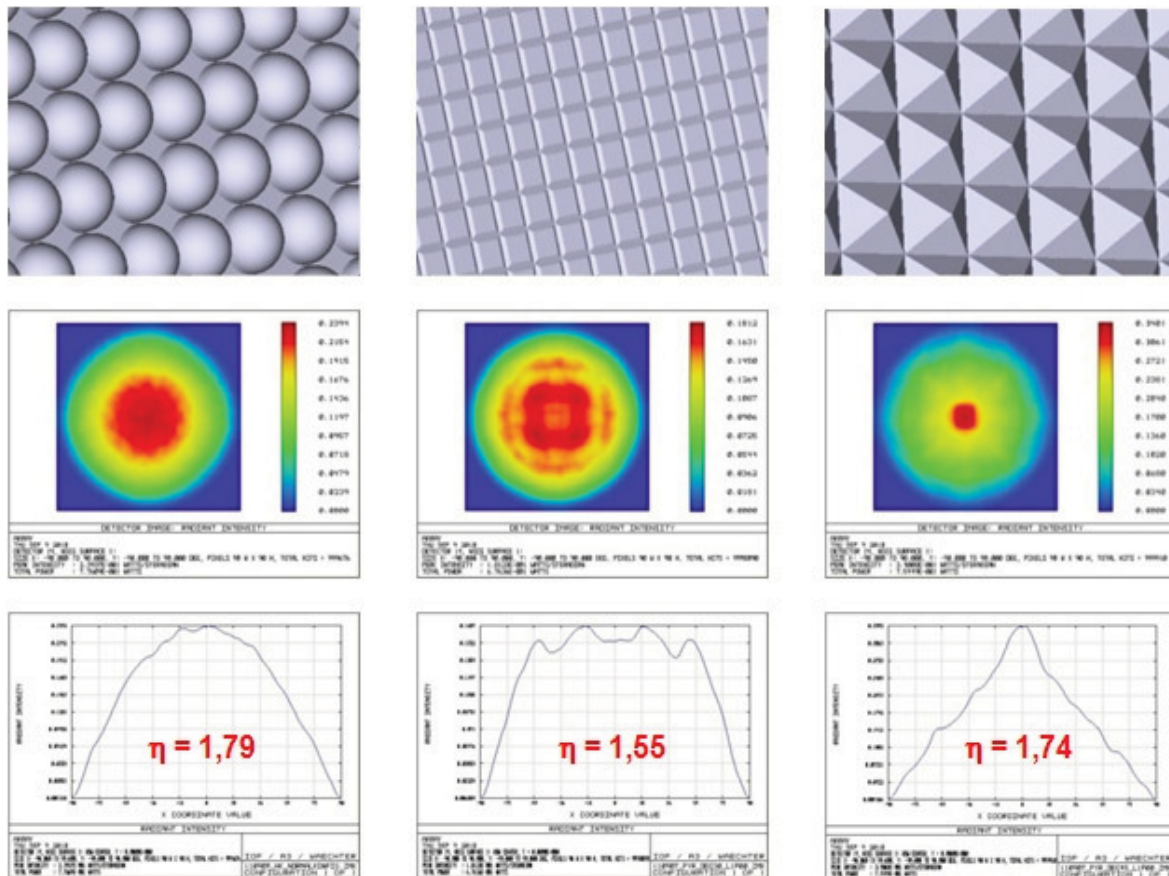


Abb. 3: Analyzierte Varianten von Mikrostrukturen bzgl. ihrer Eignung als Auskoppeloptik. Die Bilder zeigen von links nach rechts Halb-Sphären, 2D-Prismenstümpfe sowie volle 2D-Prismen nebst der damit realisierbaren Lichtverteilung. Die Effizienz, bezogen auf das OLED-Substrat ohne Auskoppeloptik ($\eta = 1,0$), ist in den Profilbildern angegeben.

Zusätzlich wurden die durch die OLED-Charakteristik in Verbindung mit der Primäroptik auftretenden Farbeffekte am Beispiel der Mikrolinsen als Auskoppeloptik untersucht. Das Ergebnis ist in Abb. 4 dargestellt.

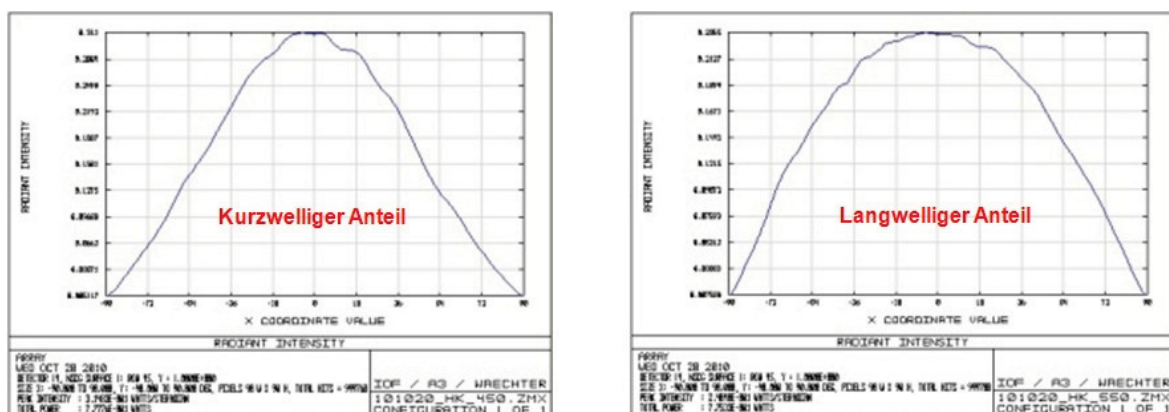


Abb. 4: Farbeffekte am Beispiel der Mikrolinsen als Auskoppeloptik. Der kurzwellige Anteil des Lichtes (links) weist eine deutliche Betonung der Vorwärtsrichtung auf, während der langwellige Anteil (rechts) einer Lambertverteilung ähnlich ist.

Hierbei hat sich gezeigt, dass kurzwelliges Licht mit einer deutlichen Betonung der Vorwärtsrichtung mit \cos^n auskoppelt. Im Gegensatz dazu ist die Verteilung im langwelligen Spektralbereich nahezu lambertsch, was auf ein deutlich besseres Lichtrecycling für diese Wellenlängen hinweist. Die Ergebnisse der Analyse bzgl. der Farbeffekte decken sich mit den bei Ilexa gewonnenen experimentellen Ergebnissen und sind allesamt erklärbar.

2.3 Prinzipielles zum Optikdesign für Sekundäroptiken (Demonstratoren)

Eine wesentliche Eigenschaft der OLEDs ist die große emittierende Fläche S in Verbindung mit einem großen Öffnungswinkel Ω (Divergenz). Dies bedeutet, dass bei OLEDs immer eine maximale Etendue $S \cdot \Omega$ als Eingangsgröße des nachgeschalteten optischen Systems vorliegt. Die Etendue ist eine Eigenschaft des optischen Systems, welche die Ausbreitung des Lichtes im Querschnitt S und Öffnungswinkel Ω beschreibt und eine Erhaltungsgröße (Lagrange Invariante) im optischen System ist:

$$S \cdot \Omega = \text{const.}$$

Bedingt durch die Abstrahlcharakteristik der OLEDs erfordern fast alle denkbaren Applikationen, wie z.B. auch die von den im Vorhaben vertretenen Endanwendern vorgeschlagenen Demonstratoren, eine mehr oder weniger große Winkelschränkung des von der OLED emittierten Lichtes. Unter Beachtung der Eigenschaft der Etendue als Erhaltungsgröße des optischen System bedeutet dies im Umkehrschluss, dass die Fläche entsprechend größer werden müsste, was de facto aber nicht möglich ist. Durch die Einschränkung des Winkelbereiches wird damit zwangsläufig auch die Fläche kleiner. Die Konsequenz ist, dass sich die Etendue des Systems ändert, was zu geometrischen Lichtverlusten und damit zu einer verringerten Effizienz führt.

Der dargestellte Sachverhalt soll im Folgenden anhand der Winkelschränkung durch die Verwendung von Blenden näher erläutert werden. Der Hintergrund dafür ist, dass alle geplanten Demonstratoren eine Einschränkung des Winkelbereiches erfordern, was z.B. durch den Einsatz von Mikrolinsen und geeignet dimensionierter Blenden realisiert werden kann. Für die Analyse wurde die auf der OLED befindliche Primäroptik als ein in etwa Lambertscher Strahler mit Emissionspeaks bei 450 nm und 570 nm angenommen, wobei der Öffnungswinkel des frei laufenden Bündels in der Sekundäroptik mit 42° angesetzt wurde. Die Einschränkung des Winkelbereiches wurde durch eine Blendenebene in der Sekundäroptik realisiert.

In Abb. 5 ist der Strahlverlauf für eine Kombination Mikrolinse/Blende dargestellt, bei der die Blende nahe an der Linsenbasisfläche angeordnet ist. Es ist zu erkennen, dass alle eingezeichneten Strahlen auf der optisch wirksamen Fläche der Mikrolinse auftreffen und entsprechend der Linsenkrümmung abgelenkt werden. Dies bedeutet, dass mit dieser Anordnung von Mikrolinse und Blende eine hohe Effizienz erzielt wird. Auftretende Lichtverluste werden maßgeblich durch Absorption im Material sowie Fresnelsche Reflexionsverluste an den Grenzflächen be-

stimmt. Die dabei realisierte Einschränkung des Öffnungswinkels fällt hingegen nur moderat aus.

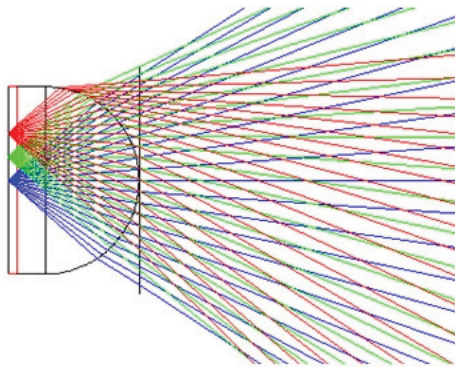


Abb. 5: Winkelschränkung mit Blendenebene nahe an der Linsenbasisfläche.

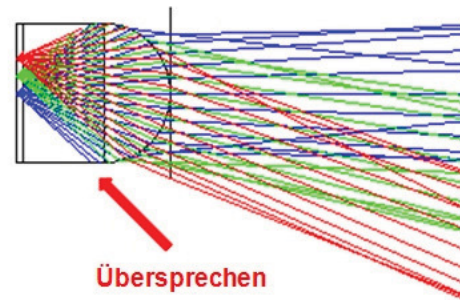


Abb. 6: Winkelschränkung mit Blendenebene in der Brennebene der Linse.

Im Gegensatz dazu ist in Abb. 6 der Strahlverlauf für den Fall dargestellt, in dem sich die Blende in der Brennebene der Mikrolinse befindet. Die Einschränkung des Winkelbereiches ist deutlich größer, allerdings trifft ein Teil der eingezeichneten Strahlen nicht mehr die optisch wirksame Fläche. Es kommt zum Übersprechen, das heißt dieses Licht trifft auf die benachbarte Mikrolinse und tritt als „Streulicht“ außerhalb des gewünschten Nutzbereiches auf. Durch geeignete Blenden- oder Absorberlayer kann dieses Licht eliminiert. In beiden Fällen steht dieser Lichtanteil nicht mehr für die gewünschte Applikation zur Verfügung, die Effizienz des Systems wird geringer.

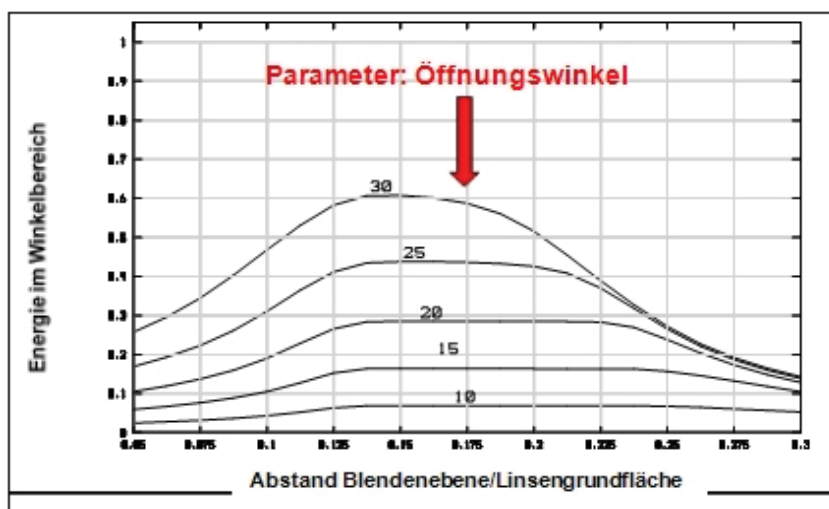


Abb. 7: Energie im Winkelbereich für unterschiedliche Öffnungswinkel in Abhängigkeit vom Abstand der Blendenebene zur Linsenbasisfläche.

Zusammenfassend ist in Abb. 7 die Energie im Winkelbereich in Abhängigkeit vom Abstand von der Blendenebene zur Linsenbasisfläche dargestellt. Parameter der Kurven ist der jeweils zu realisierende Öffnungswinkel und es ist zu erkennen, dass die Energie und damit die Effizienz bei Verringerung des Öffnungswinkels drastisch abnimmt.

Das Fazit der durchgeführten Untersuchung ist, dass bei vorgegebener OLED als Lichtquelle die in der Applikation gewünschte Winkeleinschränkung immer in Konkurrenz zur realisierbaren Effizienz steht. Es ist entweder ein geeigneter Kompromiss zwischen den beiden Parametern zu finden oder eine andere, von der Abstrahlcharakteristik bereits besser adaptierte OLED, zu verwenden.

2.4 Konzepte für die Realisierung der Sekundäroptiken (Demonstratoren)

Um eine objektive Beurteilung bzgl. der erfolgversprechendsten Demonstratorvorschläge der Endanwender unter Berücksichtigung der im Vorhaben zur Verfügung stehenden OLED durchführen zu können, wurden auf Basis der Vorbetrachtungen die Energieeffizienz η und die Radiant Intensity Ri_{\max} in Vorwärts- bzw. Vorzugsrichtung als primäre Kenngrößen gewählt. Die Referenzierung erfolgte immer auf die entsprechenden Werte des OLED-Substrates ($\eta = 0,429$, $Ri_{\max} = 0,14 \text{ W/sr}$) bzw. der OLED mit Halb-Sphären als Primäroptik ($\eta = 0,751$, $Ri_{\max} = 0,25 \text{ W/sr}$). Bei der Analyse wurden die OLED-Charakteristik und die von der Primäroptik hervorgerufenen Farbeffekte bzgl. der grundsätzlich geforderten Funktion der Demonstratoren wie Einschränkung des Winkelbereiches und Ablenkung als nachgeordnet betrachtet.

2.4.1 Vorschlag zur Realisierung der Demonstratoroptik für Hella

Vom Endanwender Hella wurden verschiedene Vorschläge für Demonstratorapplikationen unterbreitet. Die Vorschläge beinhalteten sowohl Anwendungen für den Außenbereich in Form von Schlusslicht und Bremslicht mit identischer Winkelverteilung (siehe Abb. 8) als auch für den Innenbereich in Form einer Innenraumleuchte (siehe Abb. 9).

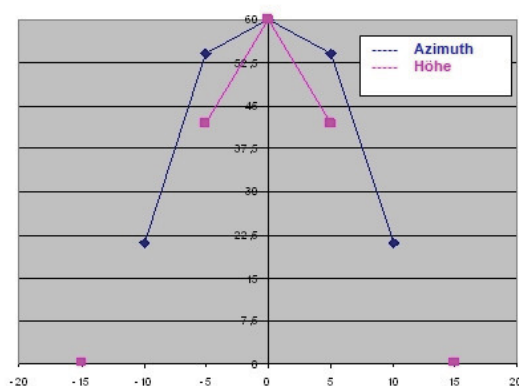


Abb. 8: Spezifikation der Winkelverteilung für die vorgeschlagenen Applikationen im Außenbereich.

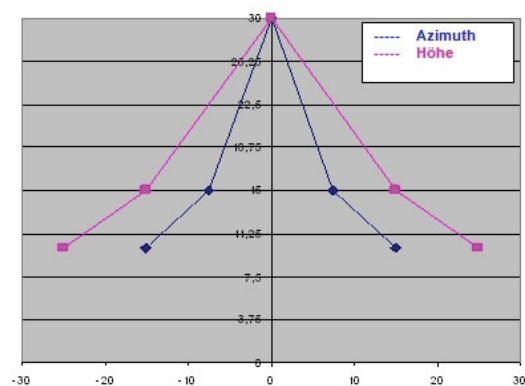


Abb. 9: Spezifikation der Winkelverteilung für die vorgeschlagene Applikation im Innenbereich.

Die Werte für die zu realisierenden Winkelverteilungen aller drei Applikationsvorschläge sind in Tab. 1 zusammenfassend sowohl für einen Helligkeitsabfall bis auf 50% (HM) als auch für einen Helligkeitsabfall auf $1/e$ der Maximalhelligkeit in Vorwärtsrichtung dargestellt.

Applikation	HM		1/e		Fazit
	Azimuth	Höhe	Azimuth	Höhe	
Schlußlicht	$\pm 7^\circ$	$\pm 7^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 10^\circ$	zu eng
Bremslicht	$\pm 7^\circ$	$\pm 7^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 10^\circ$	zu eng
Innenraum	$\pm 7.5^\circ$	$\pm 15^\circ$	$\pm 15^\circ$	$\pm 25^\circ$	1/e möglich

Tab. 1: Zusammenfassende Darstellung der zu realisierenden Winkelverteilung für die Applikationsvorschläge von Hella.

Die Analyse hat ergeben, dass die für beide Außenapplikationen erforderliche Einschränkung des Winkelbereiches unter Berücksichtigung der vorhandenen OLED zu eng ist. Die gewünschte Winkeleinschränkung geht in diesem Fall extrem gegen die Effizienz, es steht nur sehr wenig Licht tatsächlich im Nutzbereich zur Verfügung. Die gleiche Aussage gilt für die Innenraumleuchte bzgl. der zu realisierenden Winkelverteilung bei einem Helligkeitsabfall auf 50% des Maximalwertes. Im Gegensatz dazu ist die Verteilung bei $1/e$ realisierbar, allerdings ohne die vom Anwender Hella gewünschte pyramidale Verteilung.

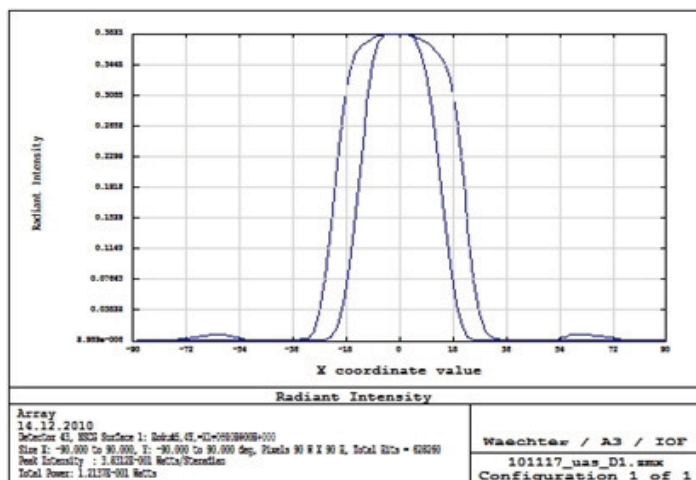


Abb. 10: Realisierbare Winkelverteilung für die Innenraumleuchte von Hella.

Die mittels Primär- und Sekundäroptik realisierbare azimuthale ($\pm 16^\circ$) und horizontale ($\pm 23^\circ$) Winkelverteilung für die Innenraumleuchte ist in Abb. 10 dargestellt. Die erreichbare Effizienz beträgt $\eta = 0,122$ und die Radiant Intensity in Vorwärtsrichtung beträgt $Ri_{\max} = 0,37 \text{ W/sr}$. Die zu realisierende Sekundäroptik besteht aus einem Array von Halb-Sphären und einer Blendenebene mit folgender Spezifikation:

- Dicke der Blendenebene: $\sim 5 \mu\text{m}$
- Pitch: $0,2 \text{ mm}$
- Blenden-Halbachsen: $0,03 \text{ mm} / 0,05 \text{ mm}$
- Radius der Halb-Sphären: $0,1 \text{ mm}$
- Abstand Blendenebene/Linsenbasisfläche: 0.120 mm

2.4.2 Vorschlag zur Realisierung der Demonstratoroptik für Siteco

Vom Endanwender Siteco wurde ein Desklight mit stark asymmetrischer Lichtverteilung als Demonstratorapplikation vorgeschlagen. Für die azimuthale Winkelschränkung wird ein Wert von $\pm 60^\circ$ bei einem Helligkeitsabfall auf $1/e$ der Maximalhelligkeit gefordert (Abb. 11). Im Gegensatz dazu wird bzgl. der Höhe eine Winkelschränkung auf $\pm 45^\circ$ bei einem Abfall der Helligkeit auf $1/e$ gefordert (Abb. 12). Zusätzlich dazu ist eine Lichtablenkung um 45° zu realisieren.

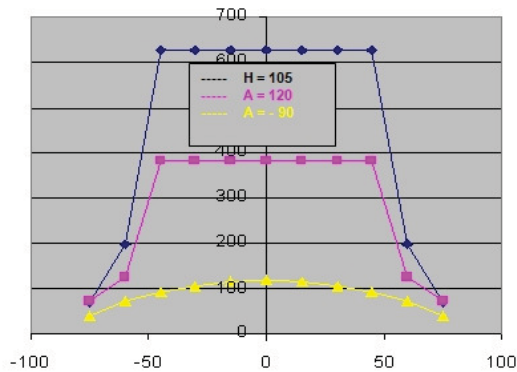


Abb. 11: Spezifikation für die azimuthale Winkelverteilung für das Desklight von Siteco.

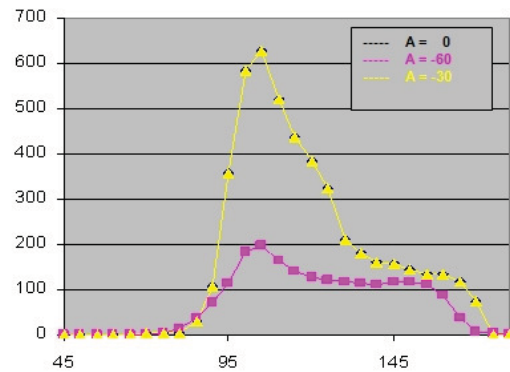


Abb. 12: Spezifikation für die Winkelverteilung bzgl. der Höhe für das Desklight von Siteco.

Erste Analysen haben ergeben, dass die Ablenkung bzgl. der Höhe um 45° nur schwer realisierbar ist. Die geforderte Winkelschränkung ist in Kombination mit einem kleineren Ablenkwinkel realisierbar. Das Plateau in der azimuthalen Winkelverteilung (Abb. 11) ermöglicht einen einstufigen Ansatz für die Sekundäroptik bestehend aus einem Reflektor mit Streifenblenden und einer Zylinderlinse. Als Parameter bei der Designauslegung wurde der Abstand Δz von Blendenebene und Linsenbasisfläche sowie die Blendenöffnung variiert.

Δz	Öffnung	Azimut	Höhe	Ablenkung	η	$R_{i_{\max}}$
0,00 mm	40%	$\pm 50^\circ$	$\pm 37^\circ$	15°	0,282	0,16 W/sr
-0,08 mm	40%	$\pm 50^\circ$	$\pm 21^\circ$	9°	0,373	0,34 W/sr
-0,04 mm	10%	$\pm 52^\circ$	$\pm 23^\circ$	18°	0,116	0,15 W/sr

Tab. 2: Auswahl an Analyseergebnissen für sinnvolle Designparameter und daraus resultierende Werte für die Winkelverteilung, die Lichtablenkung, die Effizienz und die Radiant Intensity.

Eine Auswahl an Ergebnissen der durchgeführten Analysen ist in Tab. 2 dargestellt. Neben den Parametern Δz und der Blendenöffnung sind die Winkelverteilungen in Azimut und Höhe, die Ablenkung sowie die realisierbaren Werte für die Effizienz η und die Radiant Intensity $R_{i_{\max}}$ angegeben. Die Analyse hat ergeben, dass speziell die bzgl. der Höhe geforderte Winkelschränkung auf $\pm 45^\circ$ in Kombination mit der geforderten Ablenkung um 45° in starker Konkurrenz zur

Effizienz steht. Für die geplante Applikation ist ein geeigneter Kompromiss zwischen Winkeleinschränkung, Ablenkung und Effizienz zu wählen.



Abb. 13: Realisierbare Winkelverteilung und Lichtverteilung für das Desklight von Siteco bei einer Ablenkung um 15° als Kompromiss zwischen Winkeleinschränkung, Lichtablenkung und Effizienz.

In Abb. 13 ist die mittels einer Primär- und Sekundäroptik realisierbare Winkelverteilung von $\pm 50^\circ$ (Azimuth), $\pm 37^\circ$ (Höhe) sowie die resultierende Lichtverteilung bei einer Ablenkung um 15° als Kompromiß zwischen Winkeleinschränkung, Ablenkung und Effizienz dargestellt. Die Effizienz beträgt $\eta = 0,282$ und die Radiant Intensity in Vorzugsrichtung beträgt $R_{i_{\max}} = 0,37\text{W/sr}$. Die Sekundäroptik besteht aus Zylinderlinsen und einer Blendenebene mit folgender Spezifikation:

- Radius der Zylinder: 0,1 mm
- Pitch: 0,2 mm
- Abstand Blendenebene/Linsenbasisfläche: 0,0 mm
- Lateraler Versatz zwischen Blende und Linse: 0,025 mm
- Öffnung der Blende: 40 %

2.4.3 Vorschlag zur Realisierung der Demonstratoroptik für AEG MIS

Vom Endanwender AEG MIS wurde eine Displayanwendung mit einer Einschränkung des Winkelbereiches auf $\pm 30^\circ$ sowie einer zu realisierenden Ablenkung um $10^\circ - 20^\circ$ als Demonstratorapplikation vorgeschlagen. Außerhalb des Akzeptanzwinkelbereiches des Imagers auftretende Geister sind ohne Relevanz für die Lichtverteilung, diese tragen ausschließlich zu einer Verringerung der Effizienz bei.

Als Designansatz für den Demonstrator wurde eine zweistufige Optik aus zwei gekreuzten Mikroprismenfolien (RCF) zur Winkeleinschränkung und eines Prismenarrays zur Realisierung der gewünschten Ablenkung gewählt. In einer ersten Untersuchung wurde analysiert, ob der Winkel der Mikroprismenfolien einen Freiheitsgrad bzgl. der Einschränkung des Winkelbereiches darstellt (Abb. 14).

Sowohl mittels der Mikroprismen mit einem Spitzenwinkel von 80° und 90° lässt sich die geforderte Einschränkung des Winkelbereiches auf $\pm 30^\circ$ realisieren. Dabei liegen die bei den 90° -Prismen auftretenden Geister außerhalb des Akzeptanzwinkelbereiches des Imagers und spielen für die Applikation keine Rolle. Im Gegensatz dazu liegen die Geister bei den 80° -Prismen noch innerhalb bzw. direkt am Rand des Akzeptanzwinkelbereiches und sind damit relevant für die Applikation. Bei den Prismen mit einem Spitzenwinkel von 100° ist die Winkeleinschränkung auf $\pm 30^\circ$ nicht mehr realisierbar, diese wird zu breit. Ergebnis der

Analyse ist, dass bzgl. der gewünschten Winkeleinschränkung und der Toleranz gegenüber Geistern die Mikroprismen mit einem Spitzenwinkel von 90° zu bevorzugen sind.

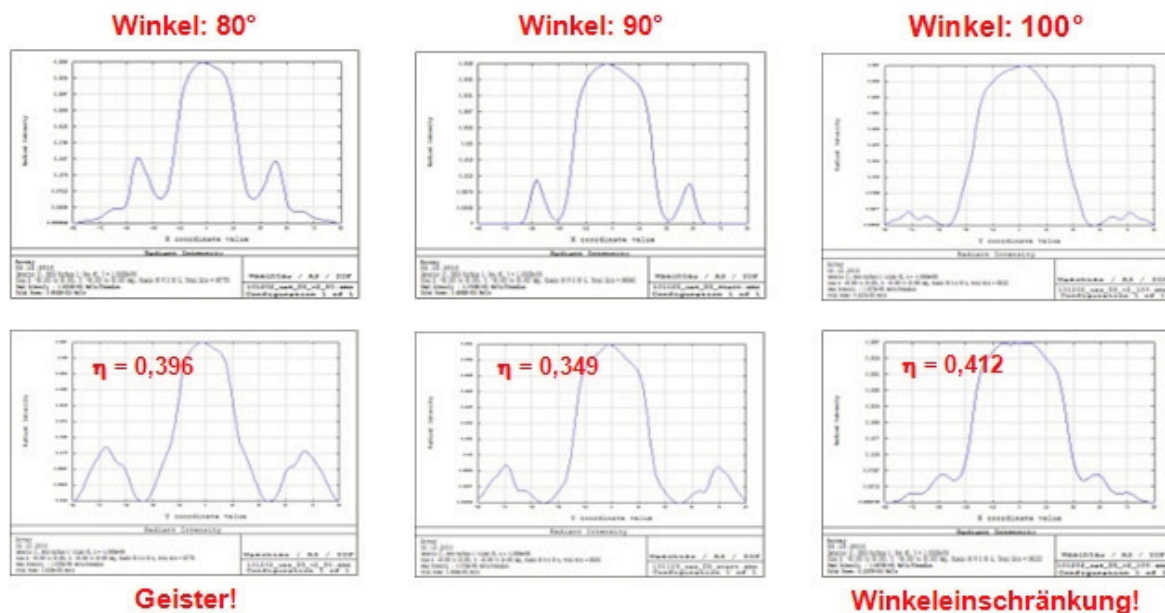


Abb. 14: Abhängigkeit der Winkelverteilung in den beiden orthogonalen Richtungen in Abhängigkeit von der Geometrie der Mikroprismen (Spitzenwinkel).

Zur Realisierung der geforderten Ablenkung um 10° - 20° wurde die Verwendung eines Prismenarrays als Designansatz gewählt. Es wurden Konfigurationen mit unterschiedlichen Prismenwinkeln analysiert, das Ergebnis ist in Abb. 15 dargestellt.

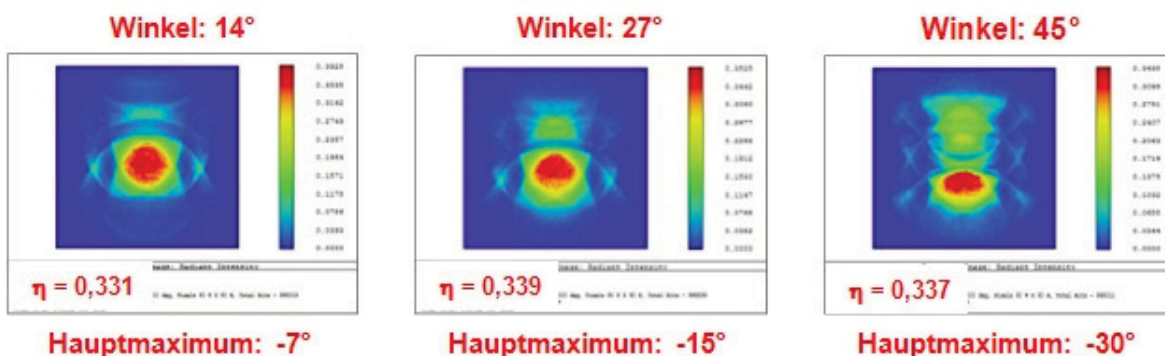


Abb. 15: Realisierbare Lichtablenkung und Lichtverteilung für die Demonstratorapplikation von AEG MIS in Abhängigkeit vom Prismenwinkel des Prismenarrays.

Die Analyse hat ergeben, daß durch die Verwendung eines Prismenarrays mit einem Prismenwinkel von 27° eine Ablenkung von 15° realisierbar ist. Bei Verwendung von kleineren Prismenwinkeln ist die Ablenkung geringer, durch die Verwendung größerer Prismenwinkel konzentriert sich ein zunehmend größerer Anteil des Lichtes im Nebenmaximum. So konzentrieren sich bei Verwendung eines Prismenarrays mit einem Prismenwinkel von 45° ca. 33 % der Gesamtenergie im Nebenmaximum. Als Ergebnis der Untersuchungen resultiert folgender Vorschlag für die Umsetzung der Demonstratorapplikation von AEG MIS:

- Winkeleinschränkung: 2 × gekreuzte Mikroprismenfolien RCF mit 90° Spitzenwinkel
- Lichtablenkung: 1 × Prismenarray mit 27° Prismenwinkel

2.5 Finale Festlegung der Demonstratoren mit den Endanwendern

Die finale Festlegung der Demonstratoren erfolgte in Zusammenarbeit mit den Endanwendern auf Basis der in den vorhergehenden Abschnitten dargestellten Analysen zum optischen Design. Wesentliche Punkte bei der Auswahl waren die Realisierbarkeit der von den Endanwendern gewünschten Lichtverteilungen und Lichtablenkungen sowie die in der Kombination von OLED, Primäroptik und Sekundäroptik realisierbare Effizienz des Gesamtsystems.

Die Analysen haben gezeigt, dass unter Berücksichtigung der zu verwendenden OLED die von den Endanwendern gewünschten Lichtverteilungen und Lichtablenkungen nur mit Einschränkungen zu realisieren sind. Dabei stehen sowohl die Lichtverteilung als auch die Lichtablenkung in allen untersuchten Fällen in starker Konkurrenz zur Leuchteneffizienz. In Tab. 3 sind zusammenfassend die zu erwartenden Effizienzen der OLED mit Primäroptik (OLED+PO) sowie der OLED mit Primäroptik und Sekundäroptik (OLED+PO+SO) im Vergleich zum reinen OLED-Substrat ohne Optik (OLED) für die erfolgversprechendsten Demonstrator-Applikationen der Endanwender Hella, Siteco und AEG MIS dargestellt.

	OLED	OLED + PO	OLED + PO + SO
Hella	$\eta = 1,00$	$\eta = 1,74$	$\eta = 0,28$
Siteco	$\eta = 1,00$	$\eta = 1,74$	$\eta = 0,66$
AEG MIS	$\eta = 1,00$	$\eta = 1,74$	$\eta = 0,79$

Tab. 3: Zu erwartende Effizienzen im Vergleich zum OLED-Substrat ohne Optik für die erfolgversprechendsten Applikationen der Endanwender im Vorhaben.

Speziell aufgrund der geringen Lichtausbeute in der Kombination von OLED, Primäroptik und Sekundäroptik wurde von allen Endanwendern entschieden, die Demonstratorapplikationen ausschließlich mit Primäroptik zur Erhöhung der Auskoppelleffizienz auszulegen. Auf den Einsatz einer Sekundäroptik zur Realisierung der definierten Lichtformung und Lichtablenkung wurde verzichtet.

Bzgl. der einzusetzenden Auskoppeloptik wurde auf Basis der Ergebnisse zur Effizienz und Lichtverteilung von allen Endanwendern entschieden, die vollen 2D-Prismen mit deutlicher Betonung der Vorwärtsrichtung (siehe Abb. 3, rechts) für die Demonstratorapplikationen zu verwenden. Darauf basierend galt es, im Rahmen des Vorhabens die folgenden Demonstratorapplikationen zu realisieren:

- Siteco, AEG MIS: Lichtkachel 100 mm × 300 mm
- Hella: Sonnenblende mit Spiegel

2.6 Anfertigung und Replikation von Fertigungswerkzeugen

Ein Arbeitspaket von Fresnel Optics beinhaltete die Untersuchung von Basistechnologien sowohl zur Fertigung von Werkzeugoriginalen als auch zur Replikation von auf diesen Originalen basierenden Fertigungswerkzeugen. Der Einsatz von Werkzeugoriginalen im Fertigungsprozess ist nicht sinnvoll, da immer die Gefahr der Beschädigung des Werkzeuges während des Abformungsprozesses besteht. Aus diesem Grund ist die Verwendung von Fertigungswerkzeugen üblich, die unter Anwendung von geeigneten Techniken aus dem Werkzeugoriginal repliziert werden müssen. Eine mögliche Technik hierfür, speziell auch unter dem Gesichtspunkt der Skalierbarkeit und Kosteneffizienz, ist die Herstellung der Fertigungswerkzeuge mittels galvanischer Replikation der Werkzeugoriginalen.

Die galvanische Replikation von Werkzeugoriginalen und die darauf basierende Erstellung von Werkzeugbäumen für die Komponentenfertigung ist eine bei Fresnel Optics etablierte Technologie. Die zu replizierenden Werkzeugoriginalen werden dafür mittels Präzisionsdiamantschneiden in ein Metallsubstrat erstellt. Nur wenig Erfahrung besteht bisher in der galvanischen Replikation von photolithographisch erstellten Werkzeugoriginalen. Da vorab nicht ersichtlich war, ob die Werkzeugoriginalen für die im Vorhaben zu realisierenden Strukturen nicht vorteilhafter mittels photolithographischer oder anderer optischer Verfahren (z.B. Laserschreiben) zu erstellen sind, wurde die vorhandene Technologie der galvanischen Replikation bzgl. ihrer Eignung für die Replikation dieser Werkzeugoriginalen untersucht.



Abb. 16: Zwischenstufen der galvanischen Replikation vom lasergeschriebenen Werkzeugoriginal (links), über das Werkzeugoriginal mit elektrisch leitfähiger Galvanikstartschicht aus Gold (Mitte) bis zum galvanisch replizierte Fertigungswerkzeug (rechts).

Die Untersuchungen wurden anhand von lasergeschriebenen Werkzeugoriginalen für ein Mikrolinsenarray und eine Diffusorstruktur durchgeführt, die von externen Partnern zur Verfügung gestellt wurden. Diese Werkzeugoriginalen bestehen in der Regel aus einem Glassubstrat als Träger einer Monomer- bzw. Polymerschicht, in die mittels Laser die zu realisierende Struktur eingeschrieben wird. Aufgrund des mono- bzw. polymeren Strukturträgers besitzen diese Werkzeugoriginalen - im Gegensatz zu den bei Fresnel Optics etablierten metallischen Werkzeugoriginalen - nicht die für eine galvanische Replikation zwingend erforderliche elektrisch leitfähige Oberfläche. Aus diesem Grund wurden die Werkzeugoriginalen zur Realisierung der elektrisch leitfähigen Oberfläche bei Fresnel Optics mit einer Goldschicht bedampft. Die daran anschließende galvanische Replikation erfolgte über mehrere Zwischenstufen bis hin zum finalen Fertigungswerkzeug und wurde am Precision Technology Center (PTC) in den USA, einem verbundenen Unternehmen, durch-

geführt. In Abb. 16 sind die Zwischenstufen vom lasergeschriebenen Werkzeugoriginal bis zum galvanisch replizierten Fertigungswerkzeug exemplarisch dargestellt.

Mit den galvanisch replizierten Fertigungswerkzeugen für das Mikrolinsenarray und die Diffusorstruktur wurden Heißprägeversuche zur Replikation dieser Strukturen in Kunststoff erfolgreich durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abb. 17 exemplarisch für das Mikrolinsenarray dargestellt.

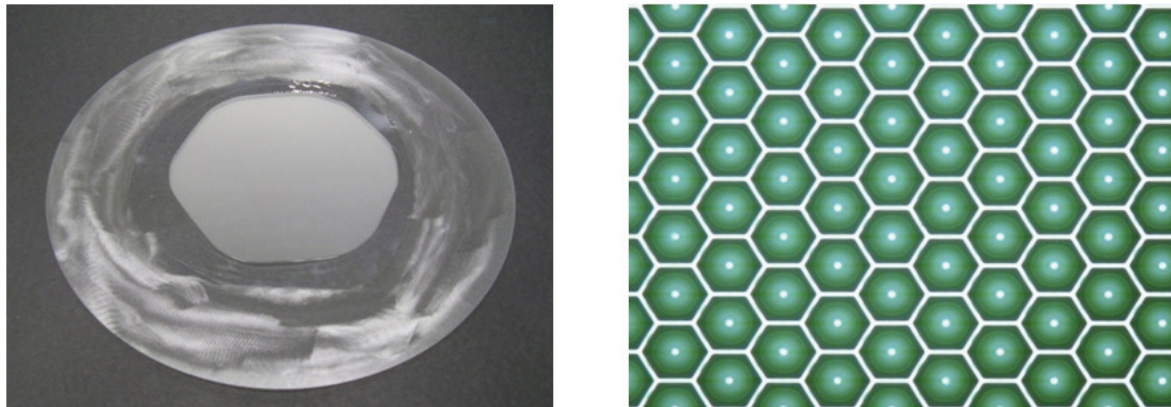


Abb. 17: Replikation des Mikrolinsenarray in Kunststoff mittels Heißprägeverfahren (links) und Mikroskopaufnahme der Struktur in der Kunststoffreplikation (rechts).

Mit den durchgeführten Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass die Technologie der galvanischen Replikation ein geeignetes Verfahren zur Erstellung von Fertigungswerkzeugen aus photolithographisch erstellten Werkzeugoriginalen bis hin zum Aufbau entsprechender Werkzeugbäume für eine Serienfertigung ist. Es wurden speziell solche Strukturen untersucht, die für die im Rahmen des Vorhabens zu lösenden Fragestellungen zum optischen Design als besonders erfolgversprechend angesehen werden konnten. Sowohl vom Mikrolinsenarray als auch von der Diffusorstruktur wurden Kunststoffabformungen in die initialen Untersuchungen des Einflusses potentieller Primäroptiken auf die Abstrahlcharakteristik der OLEDs (Abschnitt 2.1) mit einbezogen.

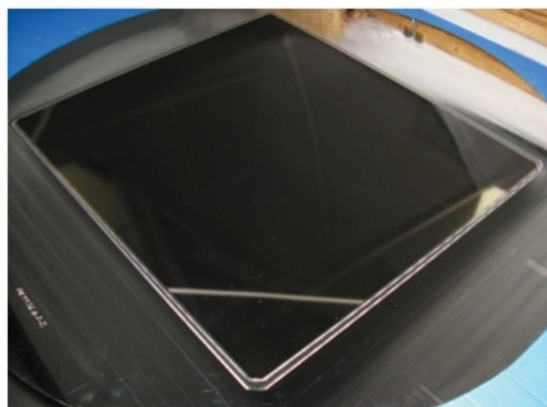


Abb. 18: Fertigungswerkzeug aus Nickel für die zu replizierenden 2D-Prismen.

Nach Entscheidung aller drei Endanwender die Demonstratoren ausschließlich mit einer Auskoppeloptik aus vollen 2D-Prismen zu realisieren und aus Effizienzgründen auf die Sekundäroptik zu verzichten, wurde hierfür ein entsprechendes Werkzeugoriginal mittels Diamantschneiden angefertigt und daraus mittels galvanischer Replikation ein Fertigungswerkzeug aus Nickel hergestellt (Abb. 18).

2.7 Realisierung der Demonstratoren für die Endanwender

In einem weiteren Arbeitspaket wurden auf Basis des in Abschnitt 2.6 beschriebenen Fertigungswerkzeuges aus Nickel für eine 2D-Prismenstruktur die Demonstratoren für alle drei Endanwender im Vorhaben realisiert. Des weiteren erforderte die Realisierung der Demonstratoren eine Weiterentwicklung bzw. Adaption von bei Fresnel Optics vorhandenen Basistechnologien unter Verwendung vorhandener Anlagentechnik. Dabei galt es, die vorhandenen Technologien bzw. Prozesse sowohl an die Spezifika der OLED selbst als auch an die spezifischen Erfordernisse bzgl. der Fertigung der Demonstratoren anzupassen.

2.7.1 Realisierung der Demonstratoren für Siteco und AEG MIS

Für die beiden Endanwender Siteco und AEG MIS war als Demonstrator-Applikation eine Lichtkachel in den Abmessungen 100 mm × 300 mm zu realisieren (siehe Abb. 19), wobei die 2D-Prismenstruktur randlos auf die opaque OLED als Substrat zu replizieren war.

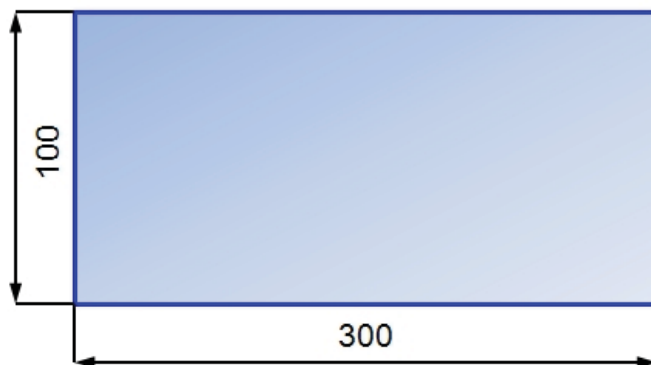


Abb. 19: Lichtkachel als Demonstratorapplikation für die Endanwender Siteco und AEG MIS.

Zur Replikation der Auskoppelstrukturen auf das Deckglas der OLED wurde der bei Fresnel Optics etablierte POG-Prozeß (Polymer On Glass) ausgewählt. Standardmäßig wird bei diesem Prozeß ein UV-härtendes Polymer und ein Glasträger definiert auf das Nickelwerkzeug aufgebracht. Die Aushärtung (Polymerisation) des Polymers erfolgt mittels anschließender UV-Bestrahlung durch den transparenten Glasträger hindurch. Da die OLED kein transparentes Substrat darstellt, ist im Gegensatz zum standardmäßigen POG-Prozeß eine Aushärtung des Polymers durch die OLED hindurch nicht möglich.

Die einzige Möglichkeit um die Auskoppelstruktur auf die opaque OLED als Substrat zu replizieren besteht in der Belichtung durch das Werkzeug hindurch. Dies ist mit dem Nickelwerkzeug nicht möglich und erfordert die Verwendung eines transparenten Werkzeuges. Basierend auf bei Fresnel Optics etablierten Technologien und dem vorhandenen Nickelwerkzeug wurde ein Prozeß zur Erstellung eines transparenten Werkzeuges entwickelt. Dafür wurden in einem ersten Schritt mit dem Nickelwerkzeug planparallele PMMA-Teile der Auskoppelstruktur heißgeprägt. Da das für den POG-Prozeß verwendete Polymer auf PMMA stark haftet wurde in einem zweiten Schritt mittels der heißgeprägten PMMA-Abformung ein SOG-Werkzeug (Silicon On Glass) erstellt. Der Zwischenschritt über die Abfor-

mung der Struktur in PMMA ist erforderlich, um immer die richtige Generation im transparenten Fertigungswerkzeug und damit auch in der Optik zu realisieren. Des weiteren wird durch den Zwischenschritt der PMMA-Abformung das Risiko der Beschädigung des originalen Nickelwerkzeuges minimiert.

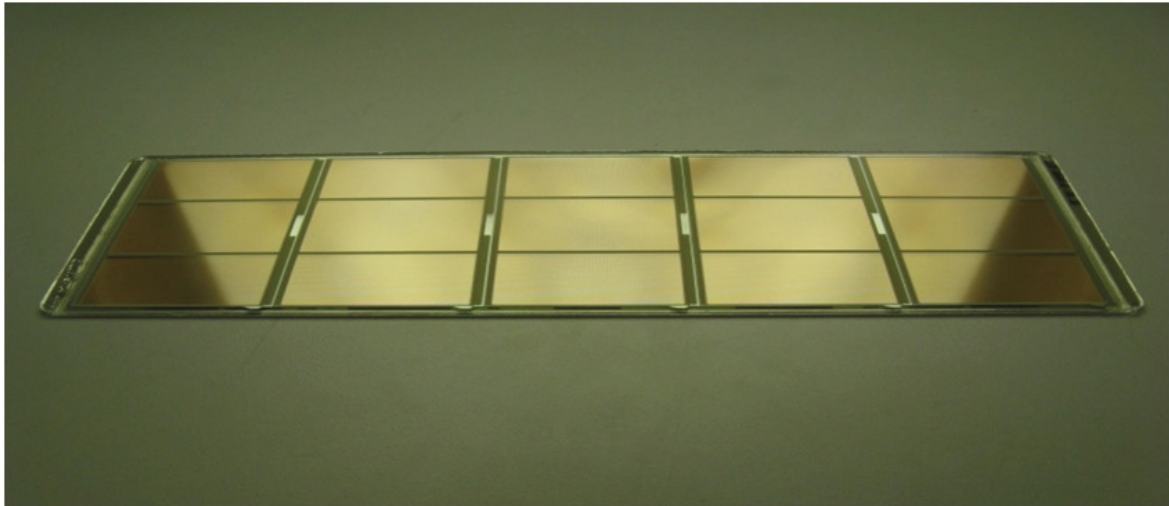


Abb. 20: Prozessierte Lichtkachel als Demonstratorapplikation für die beiden Endanwender Siteco und AEG MIS.

Durch die Verwendung der auf diese Weise erstellten transparenten SOG-Werkzeuge ist die Aushärtung des Polymers durch das Werkzeug hindurch möglich. Mit diesem Verfahren wurden insgesamt 18 Demonstratoren für die Endanwender Siteco und AEG MIS prozessiert (siehe Abb. 20).

2.7.2 Realisierung des Demonstrators für Hella

Für den Endanwender Hella war als Demonstratorapplikation eine Sonnenblende mit Spiegel zu realisieren (Abb. 21). Dieser Demonstrator erforderte zusätzlich zur Replikation der 2D-Prismenstruktur die Implementierung einer Rückflächenverspiegelung mit Aluminium sowie das Aufbringen eines schwarzen Rahmens als Blende bzw. Lichtfalle im Außenbereich.

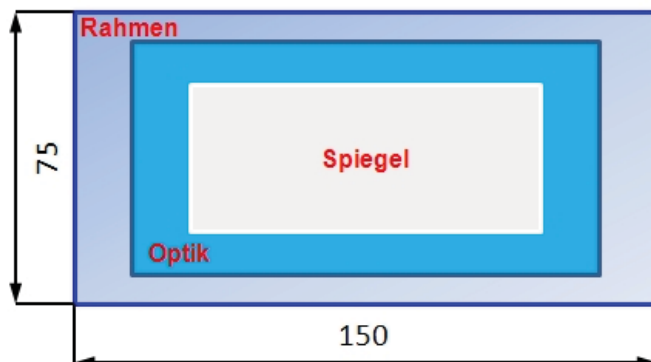


Abb. 21: Sonnenblende mit Spiegel für den Endanwender Hella.

Aufgrund der Komplexität der optischen Komponente bestehend aus Spiegel, Auskoppelstruktur und Blendenrahmen wurde entschieden, die Optikkomponente auf einem separaten Glaswafer anzufertigen und diesen anschließend mit der OLED

zu verkitten. Damit ergibt sich zusätzlich die Möglichkeit, sowohl die Verspiegelung als auch den Blendenrahmen auf der Rückseite des Glaswafers zu implementieren, damit diese nach dem Verkitten geschützt in der Kittschicht liegen. Im Gegensatz dazu muß die Auskoppeloptik auf der Vorderseite des Glaswafers repliziert werden, da die Erhöhung der Effizienz durch die Optik aus physikalischen Gründen nur in dieser Orientierung möglich ist.

Für das Aufbringen des schwarzen Blendenrahmens wurde das Siebdruckverfahren gewählt, während die Verspiegelung mittels physikalischer Beschichtung erfolgte. Hierfür wurden geeignete Sieb- und Bedampfungsmasken-Layouts für die Realisierung der erforderlichen selektiven Bedruckung bzw. Verspiegelung konzipiert und angefertigt. Die Replikation der 2D-Prismenstruktur erfolgte wiederum mittels POG-Prozeß, wofür das Konzept des transparenten Werkzeuges bzgl. der Abformung eines rechteckigen Struktursegmentes (Abb. 21, Bereich „Optik“) zu adaptieren war. Basierend auf der vorhandenen Anlagentechnik wurde eine geeignete Alignmentstrategie unter besonderer Berücksichtigung der intermaschinellen Kompatibilität zwischen Siebdruck, PVD-Prozeß und POG-Prozeß entwickelt. Darauf aufbauend erfolgte die Prozessierung auf einem Glaswafer mit einem Durchmesser von 300 mm und einer Dicke von 0,3 mm in der Reihenfolge Blendenrahmen, Auskoppeloptik und Verspiegelung. Durch diese Reihenfolge konnte eine exakte Positionierung und Ausrichtung von Siebdruck, Auskoppeloptik und Spiegel zueinander realisiert werden.



Abb. 22: Sonnenblende mit Spiegel als Demonstrator-Applikation für den Innenraum für den Endanwender Hella.

Nach der Prozessierung war es erforderlich, die Optikkomponente mittels Wafersäge aus dem Glaswafer auszusägen und diese anschließend mit der OLED zu verkitten. Aufgrund des dafür erforderlichen Equipments sowie der dazu erforderlichen Erfahrung wurden diese Arbeiten in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IOF, durchgeführt. Dazu war es in einem ersten Schritt erforderlich, geeignete Parameter für das Wafersägen sowie für die anschließende Reinigung der Optikträ-

ger zu ermitteln, wofür von Fresnel Optics vollständig prozessierte Glaswafer mit Siebdruck, Verspiegelung und Auskoppelstruktur zur Verfügung gestellt wurden. Die initialen Versuche zum Wäfersägen und der anschließenden Reinigung wurden unter hierfür standardmäßigen Bedingungen wie der Verwendung von selbstklebender Schutzfolie beim Wäfersägen und der mechanischen Reinigung mittels Aceton durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, daß die Verspiegelung durch Verwendung der selbstklebenden Schutzfolie vom Glasträger ablöst und diese somit nicht zum Schutz der Optik geeignet ist. Die Ablösung der Verspiegelung konnte durch die Verwendung einer nicht selbstklebenden Schutzfolie verhindert werden. Für die Demonstratoren selbst ist die mögliche Ablösung der Verspiegelung nicht kritisch, da diese nach der Laminierung auf die OLEDs in der Klebstoffschicht gekapselt ist. Die mechanische Reinigung der Optikträger mittels Aceton führte unabhängig von den Reinigungsparametern immer zu kleinen Kratzern auf der Verspiegelung. Das Problem der Verkratzung konnte final gelöst werden, indem die ausgesägten Optikträger mit Aceton abgespült und anschließend mittels entionisiertem Wasser und Megaschall berührungslos gereinigt wurden. Für die anschließende Verkittung von Optik und OLED war ein geeigneter optischer Klebstoff ausfindig zu machen. Um eine homogene und blasenfreie Laminierung zu realisieren waren die am besten geeigneten Dosierparameter für den ausgewählten Klebstoff zu ermitteln. Des weiteren waren für den Laminierprozeß entsprechende Vorrichtungen zur exakten Positionierung des Optikträgers auf der OLED zu konzipieren und anzufertigen. Mit diesem Verfahren wurden insgesamt 11 Demonstratoren für den Endanwender Hella prozessiert (Abb. 22).

2.8 Untersuchungen zur Lebensdauer der Optikkomponenten

In einem abschließenden Arbeitspaket wurden Lebensdaueruntersuchungen an den mittels der neu- bzw. weiterentwickelten Technologien gefertigten Komponenten durchgeführt. Auf Grund der Verfügbarkeit bei den OLEDs konnten entsprechende Untersuchungen am Verbund OLED und Optik nicht durchgeführt werden und beschränkten sich ausschließlich auf die bei Fresnel Optics gefertigten Optikkomponenten, um die Stabilität des Materialverbundes Polymer on Glass hierfür nachzuweisen.

Endanwender		AEG-MIS		Siteco	
Leuchte		LCD Backlight	2. Variante	Signalleuchte	P.Desklight
Parameter	Einheit				A.Light Tile
3. Umweltforderungen					
Lebensdauer	h	≥50k	≥ 50k	20k	>50k
Arbeitstemperaturbereich	°C	-30 bis 85	-30 bis 85	-40 bis +85	-10 bis +45
Lagertemperaturbereich	°C	-40 bis 85	-40 bis 85	-40 bis +125	-20 bis +35
Lagerzeit	a			5	3
Feuchtigkeitsbeständigkeit	% r.F.			0 - 100	0-85
Klimawechsel	°C			-40 bis +85	-20 bis +45

Tab. 4: Spezifikation der Umweltaforderungen für die im Rahmen des Vorhabens geplanten Beleuchtungs- bzw. Display-Applikationen durch die beiden Endanwender Siteco und AEG-MIS.

Endanwender		Hella			
Leuchte		Leseleuchte	Innenleuchten	Schlusslicht	Sonnenblende
Parameter	Einheit				
3. Umweltforderungen					
Lebensdauer	h	0,6k	1k	≥10k	
Arbeitstemperaturbereich	°C	-40 bis 85	-40 bis 85	-40 bis +85	
Lagertemperaturbereich	°C	-40 bis 85	-40 bis 85	-40 bis +85	
Lagerzeit	a	15	15	15	
Feuchtigkeitsbeständigkeit	% r.F.	0 - 97	0 - 97	0 - 97	
Klimawechsel	°C	-40 bis 85	-40 bis 85	-40 bis +85	

Tab. 5: Spezifikation der Umweltaanforderungen für die im Rahmen des Vorhabens geplanten Automobil-Applikationen durch den Endanwender Hella.

In der Spezifikationsphase für die Demonstratorapplikationen wurden von allen Endanwendern die Anforderungen an die Demonstratoren bzgl. Umweltbeständigkeit wie Temperatur, Feuchte und Klimawechsel festgelegt (Tab. 4 und Tab. 5). Auf Basis dieser Anforderungen der Endanwender wurden die Parameter der in DIN ISO 9022 „Optik & Optische Instrumente - Umweltprüfverfahren Teil 2: Kälte, Wärme und Feuchte“ spezifizierten Standardklimatests wie in Tab. 6 dargestellt angepasst.

	DIN ISO 9022	Angewandte Parameter
Beanspruchungsart 11 Trockene Wärme	2 Stunden bei 85°C	2 Stunden bei 125°C
Beanspruchungsart 14 Langsamer Temp.-wechsel	-50°C bis +70°C	-40°C bis +85°C 5 Zyklen à 24 Stunden
Beanspruchungsart 16 Feuchte, Wärme, Zyklisch	0 bis 100% rel. Feuchte T-Bereich nicht definiert	+23°C/85% bis +40°C/95% 5 Zyklen à 24 Stunden

Tab. 6: Parameter von Standardklimatests nach DIN ISO 9022 sowie die entsprechend der Endanwenderspezifikation angepassten Parameter für die Untersuchung der Optikkomponenten.

Zusätzlich zu den in Tab. 6 aufgeführten Klimatests wurden die Optikkomponenten noch dem „Damp Heat Test“ nach IEC 62108 Draft 9k „Concentrator Photovoltaic (CPV) Modules and Assemblies - Design Qualification and Type Approval“ unterzogen. Bei dieser Prüfung werden die zu qualifizierenden Muster für 1000 Stunden einer Temperatur von 85°C bei einer relativen Feuchte von 85% ausgesetzt. Aufgrund der Verfügbarkeit der hierfür vorhandenen Anlage mußte die Dauer dieses Tests an den Komponenten allerdings auf 125 Stunden begrenzt werden.

Die Untersuchungen zu den Umweltaanforderungen wurden an den für den Endanwender Hella gefertigten Optikkomponenten durchgeführt. Der Grund hierfür war, dass die Möglichkeit der Beschädigung dieser Komponente aufgrund von Umweltbedingungen wegen ihrer höheren Komplexität deutlich höher eingeschätzt

werden konnte als dies für die Demonstratoren für Siteco und AEG MIS der Fall war. Die Ergebnisse der Umwelttests sind exemplarisch in Abb. 23 dargestellt.



Abb. 23: Wesentliche Ergebnisse der an den gefertigten Optikkomponenten durchgeführten Klimatests nach DIN ISO 9022 sowie IEC 62108 Draft 9k.

Die durchgeführten Untersuchungen zur Umweltbeständigkeit der Optikkomponenten haben ergeben, dass diese die von den Endanwendern diesbezüglich spezifizierten Anforderungen erfüllen. Es konnte nach den Tests keine Beschädigung oder Degradation an den Optikkomponenten nachgewiesen werden. Selbst an bereits initial in der Polymerschicht für die Auskoppeloptik vorhandenen Schadstellen trat während bzw. nach den Tests keine weitergehende Polymerablösung auf. Im Gegensatz dazu wurden nach den Klimatests Ausblühungen am unbelegten Glaswafer festgestellt. Als Ursache hierfür kann eine Diffusion von Ionen während der Tests aus dem Glas heraus angenommen werden. Dies spielt für die Demonstratoren aufgrund der dort vorhandenen vollständigen Belegung des Glasträgers mit Polymer, Spiegel bzw. Siebdruck keine Rolle und wurde deshalb im Rahmen des Vorhabens nicht weitergehend untersucht.

3 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Ziel des Managements war es ein komplexes Know-How zu entwickeln, um nach erfolgreichem Projektende als Zulieferer von auf die Flächenlichtquelle OLED zugeschnittenen Optikkomponenten auftreten zu können. Im Rahmen des Vorhabens wurden von Fresnel Optics Fragestellungen zum optischen Design, zur Erstellung von Fertigungswerkzeugen aus mittels Präzisionsdiamantschneiden bzw. Photolithographie erstellten Werkzeugoriginalen durch galvanische Replikation, zur Realisierung der Demonstratoren für die Endanwender sowie zur Umweltbeständigkeit der optischen Komponenten bearbeitet. Die intensive Zusammenarbeit mit den Projektpartnern sowie dem Fraunhofer IOF in Jena als Unterauftragnehmer, machte es möglich, dass Fresnel Optics seine Fähigkeiten unter anderem auf dem Gebiet des optischen Designs weiter ausbauen konnte. Die Komplexität des Vorhabens ermöglichte außerdem, bereits vorhandene Technologien weiterzuent-

wickeln und somit Zugang zu neuen Produktfeldern zu erhalten. Dabei haben die durchgeführten Arbeiten für das Unternehmen einen besonderen Fortschritt in den Bereichen Optikdesign, Werkzeugfertigung und Fertigungsprozesse gebracht.

Ein Hauptschwerpunkt der Fresnel Optics GmbH innerhalb des Projektverbundes war die Bearbeitung von Fragestellungen zum optischen Design. Hierfür wurden die OLEDs zur Gewinnung von Basisdaten für das Design in einem ersten Schritt optisch charakterisiert. In den Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass der langwellige Anteil des emittierten Lichtes einer Lambertverteilung ähnlich ist. Im Gegensatz dazu weist der kurzwellige Anteil eine deutliche Orientierung in Vorwärtsrichtung auf, die unter größeren Winkeln emittierten kurzwelligen Lichtanteile gehen durch Totalreflexion im Substrat bzw. an der Grenzfläche vom Substrat zur Luft verloren. Des weiteren wurde der Einfluß potentieller Primäroptiken auf die Abstrahlcharakteristik der OLEDs untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass alle potentiellen Auskoppelstrukturen die Effizienz im Bereich von 12% - 46% erhöhen, wobei der erzielte Grad der Effizienzerhöhung zusätzlich von der Geometrie der jeweiligen Mikrostruktur (z.B. vom Prismenwinkel) abhängig ist.

Auf Basis der in den Voruntersuchungen gewonnenen Daten wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IOF im Unterauftrag unterschiedliche Mikrostrukturen bzgl. ihrer Eignung als Primäroptik mittels Raytracing-Software analysiert. Untersucht wurden volle 2D-Prismen, 2D-Prismenstümpfe und Mikrolinsen. Es hat sich gezeigt, dass mit den vollen 2D-Prismen nahezu die gleiche Auskoppelleffizienz von $\eta = 1,74$ zu erreichen ist wie mit den Mikrolinsen mit $\eta = 1,79$. Dabei weist die mit 2D-Prismen erreichte Winkelverteilung im Vergleich zu den Mikrolinsen eine deutliche Betonung der Vorwärtsrichtung auf. Die mit 2D-Prismenstümpfen erreichbare Auskoppelleffizienz von $\eta = 1,55$ ist im Vergleich zu den Mikrolinsen und vollen 2D-Prismen geringer, allerdings weist die Winkelverteilung ein Plateau auf. Dies kann z.B. für Anwendungen die eine gleichmäßig hohe Helligkeit über einen größeren Winkelbereich erfordern von Vorteil sein. Zusammenfassend kann aus den Ergebnissen geschlossen werden, dass der erzielte Grad der Effizienzerhöhung grundsätzlich über die Geometrie der eingesetzten Mikrostruktur gesteuert werden kann. Zusätzlich kann und sollte die Realisierung der in der Applikation gewünschten Lichtverteilung bereits durch die geeignete Auswahl der Mikrostruktur für die Auskoppeloptik positiv beeinflusst werden, wobei zu beachten ist, dass die Realisierung einer gewünschten Lichtverteilung immer in Konkurrenz zur realisierbaren Effizienz steht.

Ein weiterer Schwerpunkt im Arbeitspaket zum optischen Design war die Entwicklung von Sekundäroptiken zur Realisierung der von den Endanwendern im Vorhaben gewünschten Lichtverteilungen und Lichtablenkungen für die Demonstratorapplikationen. Hierfür wurden umfangreiche Analysen zur Identifizierung von Lösungsansätzen zur Realisierung der gewünschten Lichtverteilungen bei gleichzeitig ausreichend hohen Effizienzen des Gesamtsystems durchgeführt. Die Analysen haben gezeigt, dass unter Berücksichtigung der zu verwendenden OLED die von den Endanwendern gewünschten Lichtverteilungen und Lichtablenkungen nur mit Einschränkungen zu realisieren sind. Dabei stehen sowohl die Lichtverteilung als auch die Lichtablenkung in allen untersuchten Fällen in starker Konkurrenz zur Leuchteneffizienz. Die Effizienz des Gesamtsystems bezogen auf das OLED-Substrat ist in allen Fällen geringer als die Effizienz des OLED-Substrates selbst ohne

die Verwendung einer Auskoppeloptik. Die aussichtsreichsten Ansätze wurden mit den jeweiligen Endanwendern bzgl. der finalen Festlegung der Demonstratoren diskutiert. Wesentliche Punkte bei der Auswahl waren die Realisierbarkeit der gewünschten Lichtverteilungen und Lichtablenkungen sowie die in der Kombination von OLED, Primäroptik und Sekundäroptik realisierbare Effizienz des Gesamtsystems. Aufgrund der geringen Lichtausbeute in der Kombination von OLED, Primäroptik und Sekundäroptik wurde von allen Endanwendern entschieden, die Demonstratorapplikationen ausschließlich mit Primäroptik auszulegen und auf den Einsatz einer Sekundäroptik zur Realisierung der definierten Lichtformung und Lichtablenkung zu verzichten.

Grundlegende Voraussetzung für die Replikation optischer Komponenten ist die Erstellung der entsprechenden Werkzeugoriginale aus denen anschließend mittels galvanischer Abformung die erforderlichen Fertigungswerkzeuge repliziert werden. Die Replikation der Werkzeugoriginale ist erforderlich, da sich deren direkter Einsatz im Fertigungsprozeß aufgrund der Gefahr einer Beschädigung verbietet. Aufgrund der jeweils zu realisierenden Strukturen waren die im Rahmen des Vorhabens perspektivisch erforderlichen Werkzeugoriginale entweder mittels Präzisionsdiamantschneiden oder Photolithographie zu erstellen. Die Erstellung von Werkzeugoriginalen mittels Präzisionsdiamantschneiden und deren Replikation ist ein bei Fresnel Optics bzw. dem Precision Technology Center, einem verbundenen Unternehmen, etabliertes Verfahren. Wenig Erfahrung bestand bisher in der Replikation von Werkzeugoriginalen mittels Photolithographie. Hierfür wurden Werkzeugoriginale von externen Partnern zur Verfügung gestellt, die bei Fresnel Optics für die galvanische Replikation konditioniert, d. h. mit einer leitfähigen Startschicht für den Galvanikprozeß versehen wurden. Nach der galvanischen Replikation der Originale am Precision Technology Center konnten die Strukturen von Fresnel Optics erfolgreich in Kunststoff abgeformt werden. Wegen der Entscheidung der Endanwender die Demonstratoren ausschließlich mit einer Primäroptik in Form von vollen 2D-Prismen einzusetzen, war die Verwendung der photolithographisch erstellten und replizierten Werkzeuge für die Realisierung der zugehörigen Optikkomponenten nicht mehr erforderlich. Hierfür wurde am Precision Technology Center ein Werkzeugoriginal mittels Präzisionsdiamantschneiden erstellt und anschließend galvanisch in Nickel repliziert.

Auf Basis des Nickelwerkzeuges für die 2D-Prismenstruktur wurden die Demonstratoren für die drei Endanwender im Vorhaben realisiert. Dies erforderte die Weiterentwicklung bzw. Adaption von bei Fresnel Optics vorhandenen Basistechnologien unter Verwendung vorhandener Anlagentechnik. Dabei galt es, die vorhandenen Technologien bzw. Prozesse sowohl an die Spezifika der OLED selbst als auch an die Erfordernisse bzgl. der Fertigung der Demonstratoren anzupassen. Ein Ziel bei der Realisierung der Demonstratoren war es, die Auskoppeloptik direkt auf die opaque OLED als Substrat zu replizieren, wofür der etablierte POG-Prozeß eingesetzt wurde. Dabei erfolgt die Aushärtung des Polymers mittels UV-Bestrahlung durch das transparente Glassubstrat. Da die OLED kein transparentes Substrat darstellt, war die Aushärtung des Polymers durch die OLED hindurch nicht möglich. Aus diesem Grund wurde für die Replizierung der Auskoppelstruktur auf die OLEDs das Konzept eines transparenten Werkzeuges entwickelt. Dabei wurden als Zwischenschritt mittels des vorhandenen Nickelwerkzeuges planparallele

PMMA-Teile heißgeprägt von denen Abformungen als Silikon auf Glas (SOG) erstellt wurden. Die so erstellten SOG-Abformungen wurden erfolgreich als transparentes Werkzeug zur Replizierung der Auskoppelstruktur direkt auf die OLED eingesetzt. Der Demonstrator für Hella erforderte zusätzlich zur Replikation der Auskoppelstruktur die Implementierung einer Rückflächenverspiegelung sowie das Aufbringen eines schwarzen Rahmens als Blende bzw. Lichtfalle im Außenbereich. Die Verspiegelung erfolgte mittels physikalischer Beschichtung während für das Aufbringen des schwarzen Blendenrahmens das Siebdruckverfahren gewählt wurde. Hierfür wurden geeignete Sieb- und Bedampfungsmasken-Layouts für die Realisierung der erforderlichen selektiven Bedruckung bzw. Verspiegelung konzipiert und angefertigt. Die Replikation der Auskoppelstruktur erfolgte auch mittels POG-Prozeß, wofür das Konzept des transparenten Werkzeuges bzgl. der Abformung eines rechteckigen Struktursegmentes adaptiert wurde. Für die Realisierung wurde eine geeignete Alignmentstrategie zur exakten Positionierung von Siebdruck, Auskoppeloptik und Verspiegelung auf dem Substrat entwickelt und umgesetzt. Aufgrund der Komplexität der Komponente wurde diese auf einem separaten Glaswafer angefertigt und anschließend mittels Wafersäge aus dem Glaswafer ausgesägt und mit der OLED zu verkittet. Hierfür wurden geeignete Parameter für das Wafersägen, die anschließende Reinigung der Optikträger sowie die finale Laminierung der Optik auf die OLED ermittelt. Aufgrund des hierfür erforderlichen Equipments sowie der dazu erforderlichen Erfahrung wurden diese Arbeiten in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IOF durchgeführt.

Die Optikkomponenten wurden Lebensdaueruntersuchungen nach bzw. angelehnt an DIN ISO 9022 und IEC 62108 Draft 9k unterzogen. Aufgrund der höheren Komplexität wurden die Untersuchungen an den für den Endanwender Hella gefertigten Optikkomponenten durchgeführt. Nach den Tests konnte keine Beschädigung oder Degradation an den Optikkomponenten nachgewiesen werden. Die durchgeführten Untersuchungen zur Umweltbeständigkeit haben gezeigt, dass die Optikkomponenten die von den Endanwendern diesbezüglich spezifizierten Anforderungen erfüllen. Eine weitergehende Untersuchung am Verbund von Optikkomponente und OLED konnte aufgrund der Verfügbarkeit bei den OLEDs nicht durchgeführt werden.

Zum Ende der Laufzeit des Vorhabens konnten die gesetzten Ziele nur teilweise realisiert werden. Speziell die im Rahmen des Vorhabens vorgesehenen Arbeiten zur Umsetzung einer Sekundäroptik für die von den Endanwendern spezifizierten Lichtverteilungen wurden nach der Entscheidung der Endanwender auf die Sekundäroptik vollständig zu verzichten nicht umgesetzt. Die Ursache hierfür waren die im Komplettsystem bestehend aus OLED, Primäroptik und Sekundäroptik extrem hohen Lichtverluste bei der Realisierung der von den Endanwendern gewünschten Lichtverteilungen. Ein Lösungsansatz zur Realisierung der gewünschten Lichtverteilungen bei höheren Effizienzen ist z.B. die Verwendung von OLEDs, die von vorne herein eine für die Anwendung günstigere Auskoppelcharakteristik besitzen. Dies war im Rahmen des Vorhabens allerdings nicht möglich. Einen großen Erkenntnisgewinn für Fresnel Optics haben die Arbeiten zum Optikdesign, zur Werkzeugreplikation und den Werkzeugkonzepten (transparentes Werkzeug) sowie die entsprechende Umsetzung bei der Realisierung der Demonstratoren für die Endanwender gebracht. Mit den Arbeiten zum optischen Design für OLEDs, der Werk-

zeugreplikation und dem Konzept des transparenten Werkzeuges konnten bei Fresnel Optics neue technologische Ansätze entwickelt und realisiert bzw. bereits vorhandene Technologien und Fähigkeiten deutlich erweitert und ausgebaut werden. Die Anwendung und Weiterentwicklung der gewonnenen Fähigkeiten, auch auf der Basis von kundenspezifischen Projekten, werden im Unternehmen befürwortet und es wird aktiv nach Applikationen zur Umsetzung bzw. Weiterführung der Entwicklungsleistungen gesucht.

4 Relevante F&E-Ergebnisse von dritter Seite

Von dritter Seite sind innerhalb des Berichtszeitraumes keine für die Durchführung des Vorhabens relevanten F&E-Ergebnisse bekannt geworden. Für das Vorhaben relevante Erfindungen und Schutzanmeldungen sind nicht bekannt.